

러한 단점들을 극복하기 위해 고차형 나노구조를 지닌 다공성 구(hierarchically nanostructured mesoporous sphere, HNMS)의 구조를 가지는 칼슘 실리케이트 하이드레이트(CSH)에 대한 연구가 집중적으로 이루어졌다. 하지만, 기존의 합성법들(수열합성법, 졸겔 합성법)에 의해서는 이상적인 구조를 가지는 전달체를 만들기 어려웠으며, 잔류 계면활성제들이 문제가 되어 그 응용이 제한적이었다.

중국 Shanghai Institute of Ceramics의 Ying-Jie Zhu 연구팀은 기존에 알려진 합성법과는 다르게 음향화학적 방법을 이용하여 계면 활성제를 사용하지 않고도 손쉽게 잘 정리된 3차원 네트워크 구조를 가지는 DDS용 HNMS-CSH를 합성하는데 성공하였다. 실리콘 재공물질인 tetraethyl orthosilicate(TEOS)는 강한 초음파에 의해 칼슘이온과 반응하여 HNMS-CSH를 형성하며, ibuprofen (IBU)을 시험 약물로 사용하여 실험한 결과, 위 방법으로 합성된 HNMS-CSH가 좋은 생체활성을 보임을 확인하였다. 연구진들은 HNMS-CSH는 높은 비표면적과 다공성 및 상호 연결된 내부의 채널로 인해 약물의 전달 및 방출이 용이하다고 주장했고, 실제로 HNMS-CSH의 약물전달 특성을 알아보기 위해 서로 다른 IBU의 투약량을 가지는 HNMS-CSH를 이용하여 DDS로서의 성능을 조사하였다. 그 결과 약물 담지능력이 최고 229 wt%(HNMS-CSH 1g당 IBU 2.29g)로 기존에 보고된 MCM-41의 최고 약물 담지능력 (138 wt%)보다 66% 이상 높은 결과를 얻을 수 있었으며, 약물 담지 효율도 80% 이상으로 우수한 효율을 보였다. 또한, CSH는 약물 방출 후 모두 히드록시아파타이트로 변환될 수 있기 때문에 생체 적합성 및 생체반응성 면에서도 매우 우수함을 증명하였다.

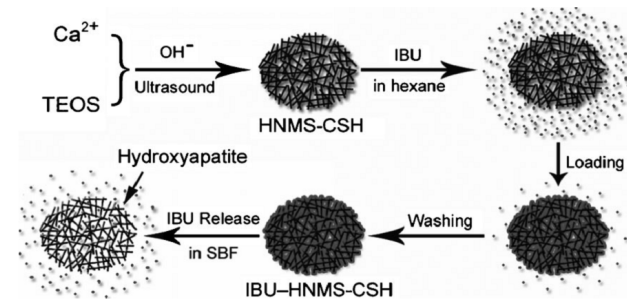


그림 3. HNMS-CSH의 약물전달 실험의 개념도.

<Adv. Mater., DOI: 10.1002/adma.200903020>

높은 결정성 박막 Donor 층을 이용한 고효율 유기 태양전지

태양 에너지의 효율적인 이용 가능성이 대두되면서, 저분자 혹은 공액계 고분자를 이용한 유기 태양전지가 주목 받고 있다. 최근 6% 넘는 에너지 변환 효율을 갖는 유기 태양전지가 보고되었지만, 아직도 무기 태양전지에 비해서는 많이 낮은 실정이다. 에너지 변환 효율을 좌우하는 주요 요인 중 하나가, exciton diffusion length가 광흡수 거리(optical absorption length)에 비하여 매우 짧다는 점인데, 이 문제점을 위해 소자의 구조적인 측면에서 bulk heterojunction 구조를 가진 유기 태양전지와 tandem cell 등의 구조에 대한 진보가 이루어져 왔다. 고분자 태양전지의 경우 열과 용매 등을 이용한 후처리를 통하여 보다 이상적인 bulk heterojunction을 이루게 함으로써, 전하의

이동도를 향상시킬 수 있었다. 저분자 태양전지의 경우는, 열을 가한 기관 위에 물질들을 함께 증착하는 기술을 통해 이상적인 bulk heterojunction 구조를 형성하고, 전하이동도를 증가시킬 수 있었지만, 열이 가해진 기관은 저분자로 구성된 광활성층 표면의 거칠기를 증가시키고 이로 인하여 높은 접촉 저항을 유발했다. 한편, 열처리하는 저분자 광활성층의 pinhole의 밀도를 증가시켜 소자의 생산수율을 저하시키는 문제점을 안고 있다.

최근 Chinese Academy of Sciences의 D. Yan 연구팀에서는 “weak epitaxy growth(WEG)” 기술을 이용하여, 단결정 유도층을 형성하고, 이를 통해, 고효율의 유기태양전지를 제조하는 연구를 발표하였다. 이 WEG 기술은 기존에 이미 유기트랜지스터의 제조에 사용되어, 우수한 결과를 보인 예가 보고되어 있고, 위의 연구팀은 기존의 구조에 2,5-bis(4-biphenyl)-bithiophene(BP2T)로 된 유도층(inducing layer)을 WEG 방법으로 도입함으로써, 광전변환효율 3.54%를 달성하였다. 연구팀은 높은 광전변환효율의 이유로, i) BP2T의 highest occupied molecular orbital (HOMO) 레벨이 5.3 eV 이고, ii) 버퍼층인 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonic acid) (PEDOT/PSS)와 정공이동층인 zinc phthalocyanine (ZnPc) 사이에서 모두 Ohmic contact를 이루고 있으며, iii) BP2T 자체의 정공이동도가 $10^{-2} \text{ cm}^2 \text{Vs}^{-1}$ 로 매우 높기 때문에 소자의 series resistance 측면에서 이점이 있기 때문이라고 설명하였다. 또한, BP2T는 2.8 eV의 낮은 lowest unoccupied molecular orbital(LUMO) 레벨을 가짐으로써 전자 폐쇄층 역할도 할 수 있었다(그림 4). 이 연구는 효과적 박막 유도층의 제조기술을 통해, 유기태양전지의 효율을 증대시킬 수 있음을 보여주는 연구 결과이다.

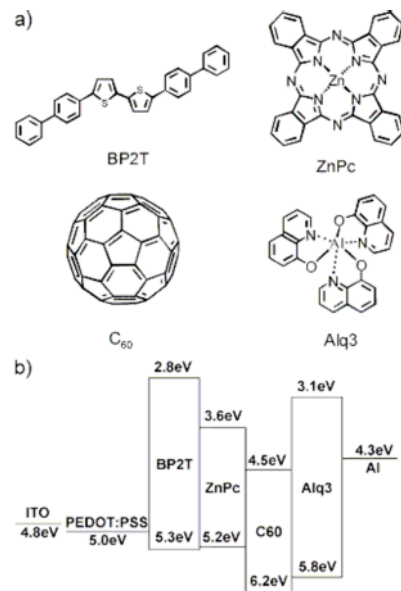


그림 4. (a) 유기 태양전지에 사용된 유기 물질들의 분자 구조. (b) Flat-band 조건에서의 energy level 도식도.

<Adv. Mater., DOI: 10.1002/adma.200903023>

용매이용-열처리 방법을 이용한 용액공정용 고성능 유기 트랜지스터

용매 증기를 이용한 후처리를 통한 유기 트랜지스터(OFET)의 성

능 향상은 매우 효과적인 방법이지만, 일반적 용매를 직접 유기막에 코팅할 경우 유기막이 손상되어 소자 성능이 저하된다는 것이 일반적인 견해이다. 최근, Chinese Academy of Sciences의 Yunqi Liu와 Dauben Zhu 연구팀은 작은 양의 용매를 고분자 활성층(active layer)에 코팅한 후 재열처리를 하면 고분자 OFET의 성능을 매우 효과적으로 향상시킨다는 연구 결과를 발표했다(그림 5).

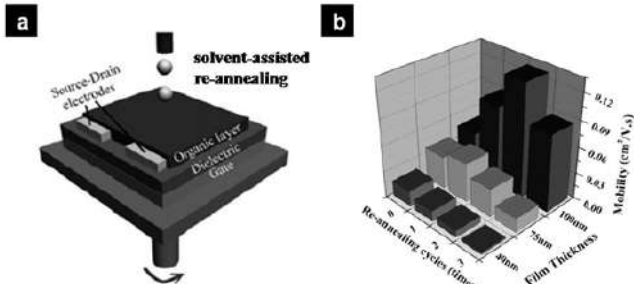


그림 5. (a) 고분자 OFET 구조, (b) 고분자 OFET 제작 조건에 따른 전하 이동도 비교.

연구팀은 용매이용-재열처리(solution-assisted re-annealing) 과정을 통해 전하 이동도가 $0.24 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 에 이르는 고분자 OFET를 구현하였으며, 용매 종류에 따라 소자 성능이 최대 80% 향상을 관찰했다. 용매를 고분자 활성층에 코팅한 직후에는 전하 이동도가 다소 감소하다가 재열처리를 거치고 나면 다시 증가하였으며, 용매 코팅을 하지 않고 재열처리 과정만 거쳤을 경우 전하 이동도의 변화는 없다. 이러한 용매이용-재열처리 과정은 고분자막의 분자배열상태를 개선시켜주는 역할을 하여, 소자의 성능이 매우 향상된다고 연구팀은 밝혔다. 고분자 필름 두께가 얇을 경우 용매이용-재열처리를 하면 오히려 전하 이동도가 감소하였으나, 필름 두께가 일정 두께 이상일 때 전하 이동도가 향상되었다(그림 5(b)). Dip-coating 방법으로 고분자 필름을 만들 경우 일반적으로 스핀코팅을 이용하여 만든 필름의 보다 내부에서 분자들의 자기 조립 시간이 길어지기 때문에 필름의 내부나노 구조의 정렬에 용이하여 소자의 성능이 더 향상되며, 이후 용매 코팅-재열처리 과정을 반복하면 정렬된 고분자 도메인 사이즈가 증가하는 것을 실험적으로 관찰했다. 또한, 용매코팅-재열처리된 소자의 인캡슐레이션(encapsulation)을 구현하여, 전하 이동도를 10-40% 증가시켰으며, 30일 후에 재측정 해도 소자 성능이 유지되는 고분자 OFET를 성공적으로 제작하였다. 연구팀은 용매코팅-재열처리 방법이 고성능, 고안정성을 가지는 고분자 OFET를 구현하는데 있어서 진보적인 기술이 될 수 있다고 연구 성과를 설명했다.

<Adv. Mater., DOI: 10.1002/adma.200902813>

고차 나노다공성 구조를 갖는 약물전달용 유리 극세 섬유 제조

많은 물질들은 그 형태와 구조에 의하여 적용분야와 성능이 결정된다. 물질의 적절한 구조를 구현하는 공정은 종종 물질의 성능을 향상시키거나 그 물질의 적용 분야를 넓힌다. 그 한가지 예가 생리활성 유리(bioactive glasses, BGs)이다. BGs의 생리활성 특성은 그들의 구조적 특징과 밀접한 관련이 있다. 예전 연구결과들의 예를 들어 보면, BG matrix에서 나노 크기의 빈 공간이 존재할 경우, 높은 표면적을

가지게 되어 생리활성물질의 담지에 매우 유용하며, 마이크로 크기의 기공이 3차원적으로 서로 연결된 구조로 되어있는 경우는 뼈 조직 공학 등에 유용하다. 이러한 마이크로/나노미터 구조 구현을 위한 재료의 합성 기술이 나노 기술의 발전에 발 맞추어 개발되고 있다. 다양한 종류의 BG 물질들과 여러 가지 제조 공정의 구현에 의해 다양한 메조기공 구조를 가진 재료들이 개발되었다. 특히, 전기방사(electro-spinning) 기술을 이용하여 합성된 나노섬유 구조는 뚜렷한 장점을 가지고 있다. BG 나노섬유의 경우 그 표면적이 매우 넓고 긴 길이의 나노섬유들이 3차원 막 안에 집합을 이루는 상호 연결된 메조기공 네트워크(interconnected macroporous network) 형태를 가지게 된다. 이러한 나노섬유 기반 멤브레인은 높은 생리활성과 생체조직 재생 scaffold로서 훌륭한 성능을 보여주었다. 그리고, 더 높은 생리활성을 갖는 BG 나노섬유의 개발을 위해서는 나노기공을 나노섬유에 부여 시킴으로써 가능할 것이라고 많은 과학자들이 제안하였다.

최근, Sichuan University의 Y. Hong과 Chinese Academy of Sciences의 X. Chen 연구팀은 nonionic triblock copolymer와 homopolymer를 co-template로 사용하여, 전기방사 기술을 통해 고차구조의 나노기공 섬유(hierarchical nanoporous fibers) 제조에 성공하였다. 이렇게 제조된 섬유는, 그 수축정도를 조절함으로써 섬유 내의 나노기공 크기를 잘 조절할 수 있었다. BG 섬유안의 충분한 나노기공의 존재는 생리활성을 증가시킬뿐 아니라, 약물전달에도 적용이 가능하다. 이 연구에서는 aminoglycoside antibiotic agent의 한 종류인 gentamicin sulfate를 나노기공성의 BG 섬유 안에 적용하여 보았고, 그 결과 나노기공의 크기에 서로 다른 담지량을 확인할 수 있었다. 이러한, 고차 나노기공 BG 섬유 멤브레인에 대한 연구 결과는 뼈 조직 공학, 부상 치료, 약물전달 등의 응용분야에 효과적으로 이용될 수 있음을 제시하고 있다.

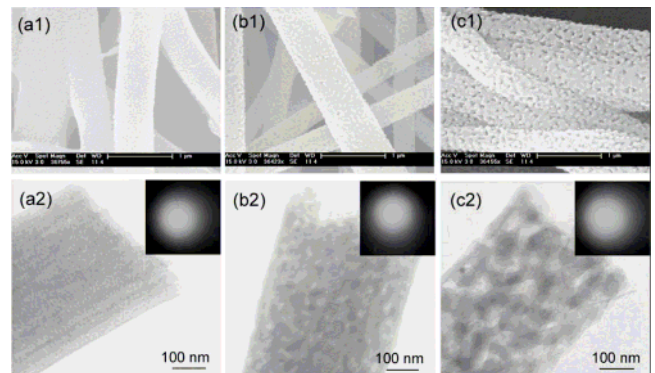


그림 6. SEM(a1, b1, c1)과 TEM(a2, b2, c2) 사진들. (a) small-pore, (b) middle-pore, and (c) large-pore BG fibers.

<Adv. Mater., DOI: 10.1002/adma.200901656>

알킬화된 전도성 그래핀 페이퍼

그래핀은 탄소원자들이 2차원인 평면형태로 결합되어 있는 구조로 높은 기계적 강도, 우수한 열전도도, 높은 전하운반 이동도(charge carrier mobility)를 가지므로, 다양한 분야로의 응용이 기대되는 재료이다. Northwestern University의 S. T. Nguyen 연구그룹은 최근 알킬화된(alkylated) 산화그래핀을 화학적 방법으로 환원시켜, 전기 전도도가 우수한 알킬화된 그래핀 페이퍼(alkylated graphene